

УДК 621.384.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

Корсак К.В., Новиков П.Э., Ловшенко И.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, k.korsak@bsuir.by

Аннотация: в данной работе представлена методика моделирования тепловой постоянной времени для неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа (микроболометров). Для исследования используется структура микроболометра, созданного с использованием технологии микроэлектромеханических систем. Приведены основные теоретические сведения о физических процессах и характеристиках, лежащих в основе устройства микроболометра. Рассмотрены основные электрофизические параметры, влияющие на постоянную времени. Представлено моделирование переходного термического процесса типовой структуры микроболометра. Описан физико-математический аппарат расчёта постоянной времени. Для определения численного значения постоянной времени использовался метод наименьших квадратов в комплексе с методом линейной регрессии с целью нахождения коэффициентов аппроксимационной кривой. Для эффективного применения названных методов производилось нормирование входных данных.

Ключевые слова: неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, инфракрасный датчик, компьютерное моделирование, постоянная времени, микроболометр.

I. ВВЕДЕНИЕ

Тепловые детекторы находят все более широкое применение в различных областях, включая системы безопасности и видеонаблюдения, пожаротушение и биомедицину. Особый интерес представляет разработка высокоэффективных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа (микроболометр). Эти устройства используют резистивный элемент с низкой теплоемкостью и высоким температурным коэффициентом сопротивления. Поглощаемое тепловое излучение вызывает значительное изменение сопротивления, что регистрируется как изменение напряжения при прохождении через детектор контролируемого тока. В отличие от полупроводниковых детекторов, в микроболометрах изменение сопротивления происходит исключительно за счет нагрева, без прямого фотонно-электронного взаимодействия. В работе используется структура микроболометра, созданного с использованием технологии микроэлектромеханических систем. Эта структура обладает рядом преимуществ: низким энергопотреблением, относительно невысокой стоимостью и возможностью работы при комнатной температуре [1–3].

Ключевой характеристикой микроболометра является постоянная времени (τ), определяющая скорость реакции на изменение теплового потока [4]. Постоянная времени характеризует скорость, с которой температура болометра реагирует на изменение мощности падающего излучения. Более низкая постоянная времени означает более быструю реакцию и более высокую частоту кадров.

II. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Основной физический процесс, определяющий постоянную времени, – это теплообмен между чувствительным элементом микроболометра и окружающей средой. Он включает в себя:

1. Теплоемкость (C): Количество теплоты, необходимое для изменения температуры чувствительного элемента на 1 градус. Зависит от материала, размера и геометрии элемента.

2. Теплопроводность (G): Скорость передачи тепла между чувствительным элементом и окружающей средой. Зависит от материала подложки, конструкции теплоотвода и условий окружающей среды.

Простейшая модель описывает постоянную времени как отношение теплоемкости к теплопроводности: $\tau = C/G$. Эта модель предполагает экспоненциальный спад температуры после прекращения воздействия излучения.

Используя методы компьютерного моделирования, наиболее простым решением нахождения постоянной времени является построение графика остывания микроболометра от времени, по сравнению с непосредственным расчётом C и G исходя из конструктивных и электрофизических параметров датчиков.

Для компьютерного моделирования используется программный комплекс компании Coventor. Использование средств автоматизированного проектирования обеспечит повышение точности результатов проектирования, а также существенное сокращение временных (в разы) и материальных (на порядок) затрат при разработке новых устройств.

Используя типовую структуру микроболометра (рисунок 1), проведено компьютерное моделирование переходного процесса, связанного с температурой и происходящего при сообщении тепловой мощности микроболометру [5, 6].

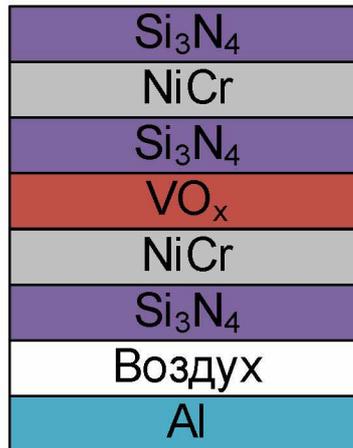


Рисунок 1. Типовая структура микроболометра

Этот процесс может быть описан следующим уравнением, описывающим увеличение температуры в зависимости от мощности падающего излучения:

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G \Delta T = Q, \quad (1)$$

где $\Delta T = T(t) - T_0$, Q – мощность падающего излучения.

Решая уравнение с граничными условиями $Q = 0$ при $t \geq 0$ (процесс охлаждения микроболометра после нагревания до определенной температуры и установления состояния термодинамического равновесия), можно получить следующую модель переходного процесса:

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{G} e^{-\frac{G}{C}t}. \quad (2)$$

Таким образом, имея приведенную зависимость, представляется возможным расчет t из полученного в Coventor переходного термического анализа путем исследования температурной характеристики детектора как функции времени при охлаждении после нагревания до максимальной рассчитанной температуры при постоянном падающем инфракрасном излучении. Для обеспечения универсальности метода, целесообразно нормировать полученные значения относительно максимального, что также повысит точность последующих расчетов, так как численные методы для определения коэффициентов экспоненциальной модели чувствительны к входным данным.

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{T(t) - T_0}{T_{MAX} - T_0}, \quad (3)$$

где $T(t)$ – температура датчика в момент времени при остывании; T_0 – конечная температура при остывании (обычно 300 К); T_{MAX} – начальная температура при остывании.

Вид переходного термического анализа представлен на рисунке 2.

Зная, что качественно график представляет собой экспоненциальную зависимость, возможно найти экспоненциальную кривую вида:

$$y = a \times \exp(b \times x), \quad (4)$$

где y – зависимая переменная (значения, которые мы пытаемся предсказать); x – независимая переменная (значения, которые мы используем для предсказания); a – коэффициент, определяющий начальное значение; b – коэффициент, определяющий скорость роста (или убывания) экспоненты.

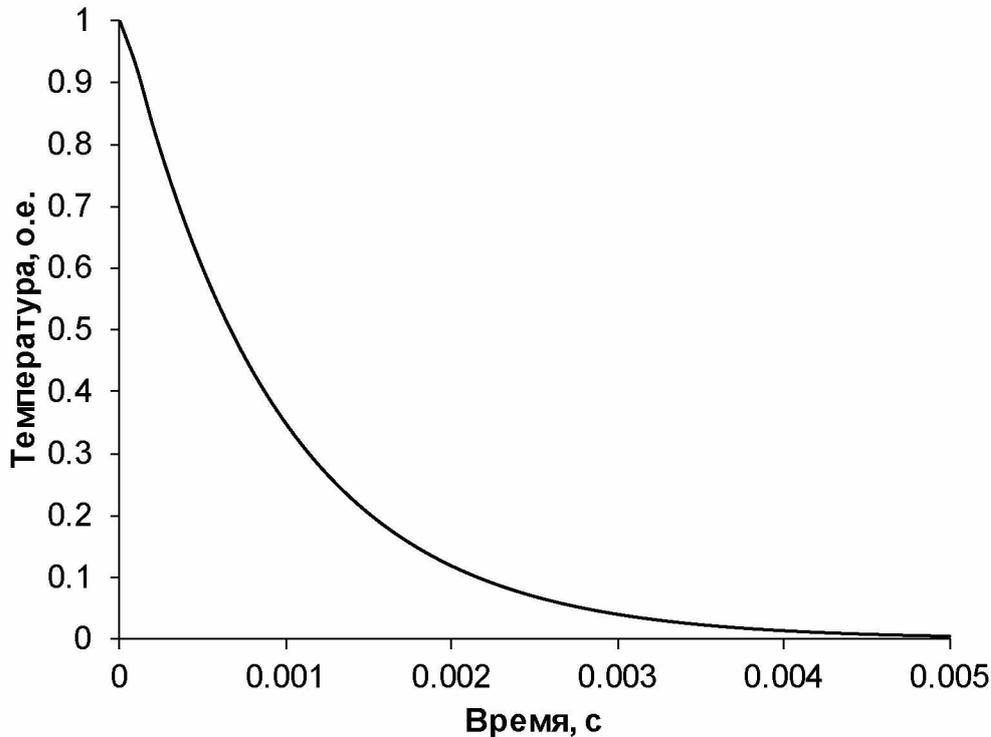


Рисунок 2. Зависимость температуры от времени при остывании микроболометра

Термическая постоянная времени определяется как

$$\tau = \frac{1}{|a|}. \quad (5)$$

Наиболее простым методом определения коэффициентов кривой из данных переходного термического анализа является использование метода линейной регрессии, преобразуя экспоненциальную модель в линейную с помощью логарифмирования:

$$\ln(y) = \ln(a) + b \times x. \quad (6)$$

Теперь это линейная зависимость между $\ln(y)$ и x , где $\ln(a)$ – свободный член, b – угловой коэффициент.

Используя метод наименьших квадратов для нахождения значений a и b , согласно которому минимизируется сумма квадратов отклонений между фактическими значениями y и значениями, предсказанными экспоненциальной моделью. Этот процесс включает в себя решение системы линейных уравнений, полученных из условия минимизации суммы квадратов отклонений [7].

Таким образом, для зависимости на рисунке 2, получена экспоненциальная зависимость

$$y = 1,0278e^{-1081,2067x}. \quad (7)$$

Таким образом, постоянная времени $\tau = 0,925$ мс. Полученные коэффициенты a и b обеспечивают коэффициент корреляции $R^2 = 0.99999365$ относительно исходных данных.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы описан метод моделирования тепловой постоянной времени для неохлаждаемых микроболометров, разработанных с использованием технологии микроэлектромеханических систем, а также изложены основные физические принципы работы микроболометра и рассмотрены ключевые электрофизические параметры, определяющие его постоянную времени. Моделирование проведено

для типовой структуры микроболометра, с подробным описанием используемого физико-математического аппарата. Численное значение постоянной времени получено методом наименьших квадратов, применённым к линейной регрессии после нормирования входных данных для повышения точности аппроксимации, и составила 0,925 мс, при этом коэффициент корреляции для коэффициентов $a = 1,0278$ и $b = -1081,2067$, составил $R^2 = 0.99999365$.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках обеспечения решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.3.3).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wood R. A., Han C. J., Kruse P. W. (1992) Integrated Uncooled Infrared Detector Imaging Arrays. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5th Technical Digest, IEEE. 132–135.
- [2] Takamuro D., Tomohiro M., Takaki S. (2011) Development of New SOI Diode Structure for Beyond 17-umPixel Pitch SOI Diode Uncooled IRFPAs. Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering. (8012), 80121E.
- [3] Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess C. (2010) DRS Uncooled VOx Infrared Detector Development and Production Status. Proc SPIE. (7660), 76600V.
- [4] Svatoš V. et al. Precise determination of thermal parameters of a microbolometer //Infrared Physics & Technology. – 2018. – Т. 93. – С. 286-290.
- [5] Van Trieu T. et al. Application of Cad Systems to Accounting for Mechanical Stresses in the Development of Uncooled Thermal Detectors of the Bolometric Type //ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ. – 2023. – Т. 29. – №. 1. – С. 73.
- [6] Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review //MEMS/MOEMS technologies and applications III. – 2008. – Т. 6836. – С. 125-139.
- [7] Gavin H. P. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems //Department of Civil and Environmental Engineering Duke University August. – 2019. – Т. 3.

DEVELOPMENT OF A THERMAL TIME CONSTANT MODELING TECHNIQUE FOR UNCOOLED THERMAL DETECTORS OF BOLOMETRIC TYPE

K.V. Korsak, P.E. Novikov, I.Yu. Lovshenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
k.korsak@bsuir.by

Abstract: This work presents a methodology for modeling the time constant of uncooled bolometric thermal detectors (microbolometers). The research utilizes a microbolometer structure fabricated using microelectromechanical systems technology. The fundamental theoretical information on the physical processes and characteristics underlying the microbolometer device is provided. The main electrophysical parameters affecting the time constant are considered. Modeling of the transient thermal process of a typical microbolometer structure is presented. The physico-mathematical apparatus for calculating the time constant is described. The least squares method in conjunction with linear regression was used to determine the numerical value of the time constant, aiming to find the coefficients of the approximating curve. Input data normalization was performed for the efficient application of these methods.

Keywords: uncooled thermal detector of bolometric type, infrared sensor, computer simulation, time constant, microbolometer.